J. Robert Oppenheimer

A Oppenheimer se le recuerda sobre todo por la influencia que tuvo durante la segunda guerra mundial; pero en los años treinta hizo muchas contribuciones importantes a la física teórica

John S. Rigden

Hace cincuenta años, el 16 de julio de 1945, poco antes del amanecer, una explosión prodigiosa incendió el cielo del desierto de Nuevo México. Entre los testigos de este acontecimiento estaban muchos de los físicos más notables de este siglo. Mientras contemplaban el ardiente resplandor, protegidos por gafas de soldador, se apoderó de ellos una idea preocupante: había empezado la era nuclear. El testigo principal, el hombre que había dirigido el proyecto de la bomba atómica desde el inicio, era J. Robert Oppenheimer.

Oppenheimer fue un individuo singular. Su agudeza intelectual, sus muchos intereses, la fragilidad de su físico y lo etéreo de su personalidad le otorgaron proporciones legendarias. Tras la segunda guerra mundial se hizo famoso por haber dirigido a los físicos que construyeron la bomba atómica en el laboratorio de Los Alamos. Su éxito como director del proyecto Manhattan le convirtió en una personalidad influyente y, durante cierto tiempo, disfrutó de la autoridad y el poder que le correspondían.

Pero en junio de 1954, en medio de la paranoia anticomunista del macartismo, la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos (AEC) llegó a la conclusión de que el carácter de Oppenheimer tenía defectos que le convertían en un riesgo para la seguridad nacional. Albert Einstein y otros miembros del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, Nueva Jersey, cuyo director era por entonces Oppenheimer, le prestaron su apoyo. En octubre, los consejeros del Instituto le reeligieron director, cargo que conservó hasta un año antes de su muerte, en febrero de 1967. Pero, tras las acciones de la AEC, su liviana figura era la de un hombre destrozado.

Los historiadores han escrito poco acerca del Oppenheimer que, diez años antes de la guerra, dio vigor a la física teórica estadounidense, lo que es una pena por varias razones. La primera es que se hizo físico en el más singular de los momentos, cuando se estaban formando las teorías de la mecánica cuántica y de la física nuclear y se revisaba buena parte del pensamiento tradicional al respecto. La segunda es que hizo muchas contribuciones importantes en diversas áreas de la física antes de ponerse al frente de Los Alamos, aunque a veces se diga que logró menos de lo que prometía.

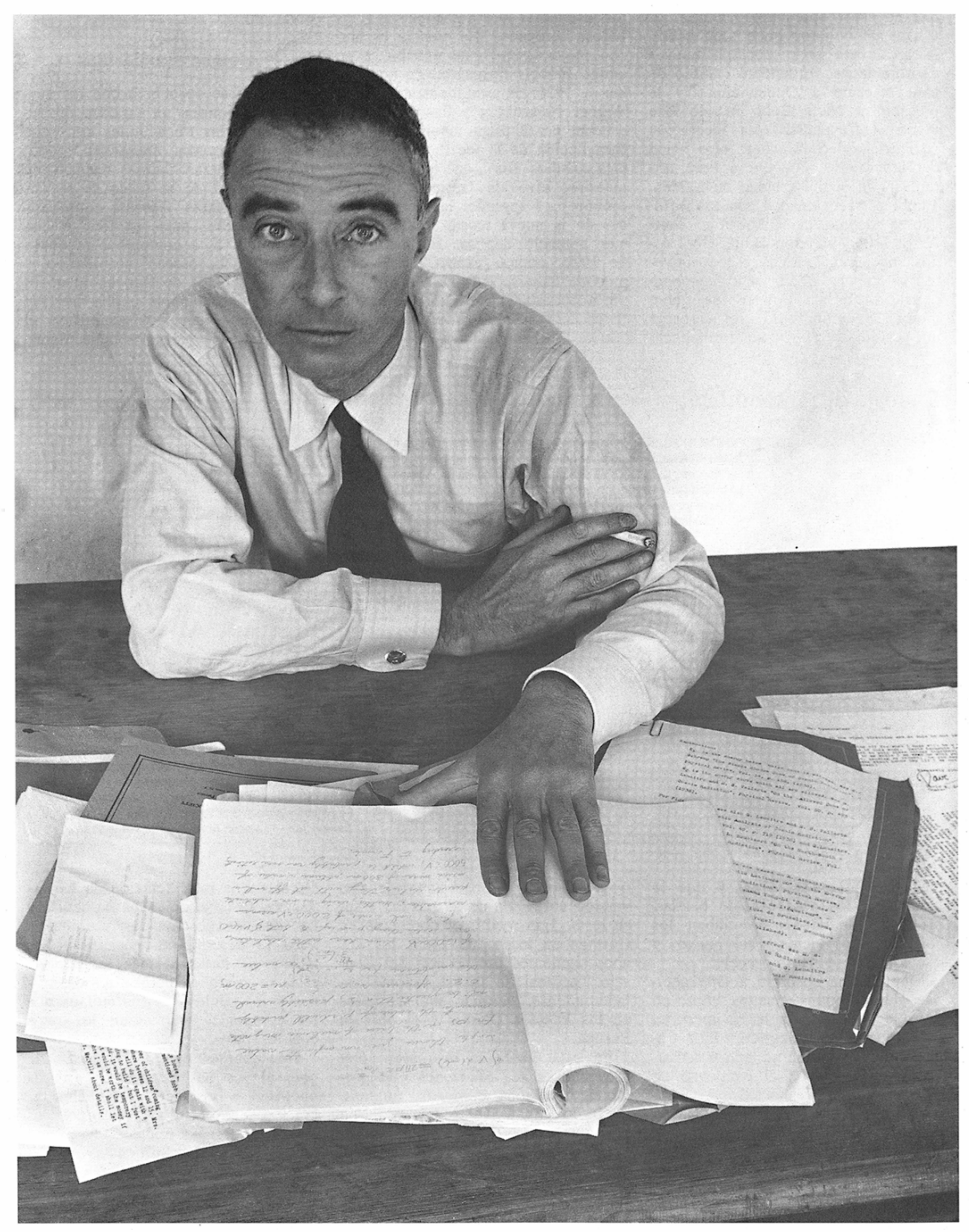
Así, por ejemplo, sentó los fundamentos de las investigaciones contemporáneas de la física molecular; fue el primero en reconocer el efecto túnel, fenómeno mecanocuántico que es la base de la microscopía de barrido por efecto túnel, con la que se descubre la estructura de las superficies átomo a átomo; estuvo a punto de predecir la existencia del positrón, la antipartícula del electrón; planteó varias dificultades cruciales de la teoría de la electrodinámica cuántica; desarrolló la teoría de los chaparrones de rayos cósmicos; y, mucho antes de que las estrellas de neutrones y los agujeros negros formaran parte de nuestro paisaje celeste, demostró que las estrellas de gran masa pueden derrumbarse bajo la influencia de las fuerzas gravitatorias.

De la química a la física

Como muchos físicos de su época, Oppenheimer estudió primero química. “Comparada con la física”, decía, “va derecha al meollo de las cosas”. Recién llegado a la Universidad de Harvard comprendió que “lo que me gustaba de la química se parecía mucho a la física”, así que a la hora de elegir facultad para su licenciatura sometió una lista de asignaturas al departamento de física. Se apuntó a muchas clases de física, pero también a muchas otras que le interesaban de otras áreas. Solía decir que, durante estos años, no recibió más que “un baño muy rápi, superficial y apasionado de algu s partes de la física”. Y confesa: “Me gustaba trabajar, pero me d-perdigué mucho y me salió bien e milagro; saqué sobresaliente en n-chas asignaturas en las que no cra merecerlo.”

Sea o no verdad, Oppenheimer -quirió sólida experiencia en el la-ratorio de Percy W. Bridgman, privilegio que obtuvo por sus eleva s calificaciones. En los años veinte -minaban la física estadounidense -perimentadores como Bridgman, o de los primeros investigadores de s propiedades de la materia sometid a altas presiones y constructor de b-na parte de los aparatos requeri s para ello. La distinción entre la fica experimental y la teórica no f, pues, una idea nítida en la mente l joven Oppenheimer. La física teóra se consideraba en buena medida a actividad europea. “No sabía e uno pudiese ganarse la vida de a manera [como físico teórico]”, co una vez recordando sus días de -tudiante universitario.

En consecuencia, al acercarse u licenciatura en 1925 quiso trabar con Ernest Rutherford, uno de s mayores experimentadores del sig, en el laboratorio Cavendish de Cabridge, Inglaterra. Rutherford ha a realizado los experimentos en los e se descubrió que los átomos con-nían unos cogollos pequeñísimos y pesados, los núcleos. Pero las c-denciales de Oppenheimer no impsionaron a Rutherford, que rech ó su solicitud. Oppenheimer escrió entonces a Joseph John Thoms , otro renombrado experimentador l Cavendish. Este le aceptó como -tudiante investigador y le puso n una esquina del laboratorio a deposar películas delgadas sobre una base le colodión. “Lo estoy pasando ny mal”, le escribió a un amigo del -chillerato en noviembre de 1925. El trabajo del laboratorio es aburridi-



Oppenheimer, 1904-1967

mo y lo hago tan mal que me parece que no estoy aprendiendo nada."

Tras un invierno poco prometedor, la primavera trajo consigo nuevas oportunidades. Rutherford cambió de idea respecto a Oppenheimer y le presentó a Niels Bohr cuando éste visitó el Cavendish; por mediación de Patrick M. S. Blackett, otro físico del laboratorio, conoció a Paul Ehrenfest, de la universidad de Leiden. También trabó amistad con los influyentes físicos de Cambridge Paul A. M. Dirac y Ralph H. Fowler. Todos ellos eran teóricos y contribuyeron a que se ampliase su concepto de la disciplina. Fowler fue quien mejor le comprendió; le aconsejó que estudiase el nuevo formalismo

Oppenheimer conoció en Gotinga los problemas que preocupaban a los físicos europeos. "La ciencia es mucho mejor [aquí]", le escribió a su amigo Francis Furgusson en noviembre de 1926. En esos momentos, Born, Werner Heisenberg y Pascual Jordan estaban en Gotinga, ocupados en la formulación de la teoría de la mecánica cuántica. Born, que era muy buen maestro, hizo de Gotinga un sitio óptimo para aprender las complejidades de la nueva teoría. Y Oppenheimer aprendió deprisa. En diciembre de 1926, apenas cuatro meses después de haberse matriculado allí, envió a la destacada revista alemana de física *Zeitschrift für Physik* un artículo "Sobre la teoría cuántica de los espec-

ayudaba su experiencia previa de laboratorio.

Atomos y moléculas

Cuando se descubrió que los átomos emitían un espectro discreto durante las transiciones entre sus diferentes estados energéticos sonaron las primeras alarmas respecto de la corrección de la física de los siglos precedentes. Atomos y moléculas constituían, pues, en 1927 el crisol natural para comprobar la nueva teoría de la mecánica cuántica y también la valía de Oppenheimer. Su primera contribución importante fue dar con una manera de simplificar el análisis de los espectros moleculares.

La forja de un científico

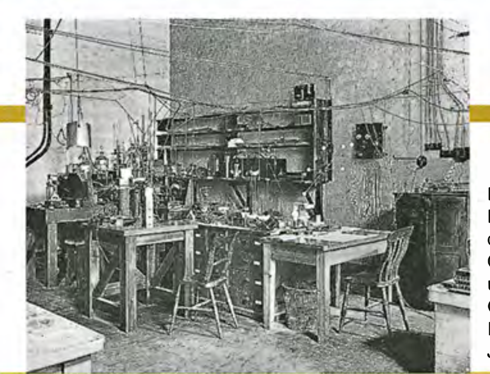
1925–1927

PERCY BRIDGMAN (*a la izquierda*) le pidió al estudiante Oppenheimer que trabajase en su laboratorio de la universidad de Harvard. Bridgman fue uno de los pioneros de la física de alta presión durante los años veinte y construyó buena parte del equipo que hacía falta para sacar adelante sus investigaciones. Su manera de proceder, "manchándose las manos", influyó con toda probabilidad en la decisión de Oppenheimer de dedicarse a la física experimental tras licenciarse en 1925.

1925 1926



1927



EL LABORATORIO CAVENDISH de Cambridge, Inglaterra (a derecha e izquierda), fue la casa de Oppenheimer durante un año tras dejar Harvard. Quería trabajar allí con Ernest Rutherford, pero a éste, uno de los mayores experimentadores del siglo, Oppenheimer no le produjo buena impresión inicial. Fue ayudante de otro renombrado físico del Cavendish, Joseph John Thomson (*arriba*).

mecanocuántico de Dirac y que lo aplicase a los espectros de bandas, problema donde se mezclaban los conocimientos viejos y los nuevos y que aún no se había resuelto.

El problema absorbió a Oppenheimer durante unos cuantos años, en los que desarrolló la teoría moderna de los espectros continuos. Este trabajo no sólo originó su primer artículo, sino que marcó el comienzo de su carrera como físico teórico. Cuando Max Born visitó el Cavendish en el verano de 1926 y le sugirió que siguiese sus estudios de doctorado en la universidad de Gotinga, un bastión de la física teórica, aceptó sin titubear. "Me sentí completamente liberado de la obligación de tener que volver al laboratorio", le dijo al filósofo Thomas S. Kuhn durante una entrevista realizada en 1963.

tros continuos". Se trataba de una versión abreviada de la que iba a ser su tesis. Tras recibir el doctorado en Gotinga en marzo de 1927, los dos años siguientes fue becario del Consejo Nacional de Investigaciones estadounidense, pasando uno de ellos en los Estados Unidos y el otro en Europa.

En esta época le resultaron muy provechosas sus relaciones con prominentes físicos europeos, quienes, según le dijo a Kuhn, le orientaron y le pusieron en contacto con la física de verdad. No obstante, los problemas que investigaba eran fundamentalmente los que él mismo elegía. En los años posteriores colaboró estrechamente con físicos experimentales, muchos de los cuales reconocieron que entendía sus datos mejor que ellos mismos; sin duda le

Gracias a la interpretación de los espectros se determinan la estructura y las propiedades de las moléculas. Pero la descripción mecanocuántica exacta de hasta la más sencilla de ellas se complica porque los electrones y los núcleos de los átomos que las componen interactúan los unos con los otros.

Oppenheimer cayó en la cuenta de que, al ser tan dispares las masas nucleares y las electrónicas, cabía ignorar sus interacciones casi por entero. Los pesados núcleos reaccionan tan despacio a las influencias mutuas que los electrones completan varios ciclos de su movimiento antes de que los núcleos hayan descrito siquiera una pequeña parte de los suyos. Mientras estaba de vacaciones, redactó un escrito breve sobre el tema y se lo envió a Born. A éste

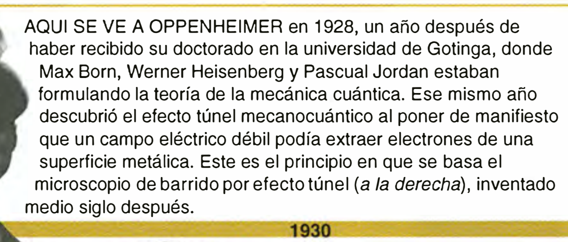
le dejó atónito la brevedad de ese borrador y pergeñó un artículo de una treintena de páginas donde mostraba con detalle que la vibración y la rotación de los núcleos se podían tratar con independencia del movimiento de los electrones. La aproximación de Born-Oppenheimer es hoy el punto de partida para los físicos y los químicos que se dedican al análisis molecular. Luego Oppenheimer determinó la probabilidad de que un átomo capture a un electrón de otro átomo. Ateniéndose a la aproximación de Born-Oppenheimer, mostró que la probabilidad es independiente del potencial internuclear entre los dos átomos.

Oppenheimer fue el verdadero descubridor, en 1928, de otro fenómeno mecanocuántico, el efecto túnel. Hay diversas circunstancias teóricas que conducen a él, como la de un electrón que se comporte como una bola de billar infinitesimal, en cuyo caso puede escapar de los límites que normalmente le tienen confinado. El ejemplo más común de efecto túnel es el que se produce cuando un núcleo expele una partícula alfa durante la desintegración radiactiva. Las fuerzas nucleares y las electrostáticas restringen los movimientos de una partícula alfa dentro de un núcleo de uranio de tal modo que, desde el punto de vista clásico, no tiene forma de abandonarlo. Mecanocuánticamente, en cambio, puede atravesar la barrera que la rodea y deslizarse fuera, como por un túnel.

En el verano de 1928 tanto George Gamow como, por su parte, Edward U. Condon y Ronald W. Gurney explicaron la desintegración radiactiva por medio del efecto túnel. Los autores de libros de texto así lo reconocen, pero implícitamente dan a entender que fueron ellos quienes descubrieron el fenómeno, lo que no es verdad. Varios meses antes, en marzo, Oppenheimer había remitido a los *Proceedings of the National Academy of Sciences* un artículo que ponderaba el efecto que un campo eléctrico tiene sobre un átomo. Según la física clásica, un átomo no puede disociarse más que mediante un campo eléctrico intenso, pero, según el punto de vista cuántico, un campo débil puede separar un electrón del átomo al que pertenece porque el electrón puede atravesar, mediante el efecto túnel, la barrera que lo mantiene ligado a él. Oppenheimer mostró que un campo eléctrico débil podría extraer electrones de la superficie de un metal. Medio siglo después, en 1982, Gerd Binnig y Heinrich Rohrer, del Laboratorio de Investigación de IBM en Zurich, desarrollaron el microscopio de barrido por efecto túnel, basado en tal principio [*véase* "El microscopio de efecto túnel", de Gerd Binnig y Heinrich Rohrer; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1985].

1928–1930





1928

1930

AQUI SE VE A OPPENHEIMER en 1928, un año después de haber recibido su doctorado en la universidad de Gotinga, donde Max Born, Werner Heisenberg y Pascual Jordan estaban formulando la teoría de la mecánica cuántica. Ese mismo año descubrió el efecto túnel mecanocuántico al poner de manifiesto que un campo eléctrico débil podía extraer electrones de una superficie metálica. Este es el principio en que se basa el microscopio de barrido por efecto túnel (*a la derecha*), inventado medio siglo después.

1929



PAUL A. M. DIRAC (*izquierda*) ideó una ecuación de ondas relativista que describía el electrón en 1928. Su trabajo, aunque exacto en muchos aspectos, suscitó varios problemas perturbadores. Oppenheimer criticó perspicazmente la teoría de Dirac y, al desarrollar su argumentación, estuvo a punto de predecir la existencia del positrón.

Partículas y campos

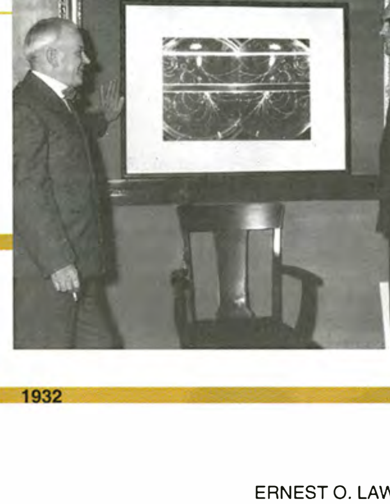
Los últimos meses que Oppenheimer pasó en Europa, de enero a junio de 1929, estuvo con Wolfgang Pauli en el Instituto Federal Suizo de Tecnología en Zurich. Tras los años de aprendizaje, su interés se había desplazado de las aplicaciones de la mecánica cuántica a cuestiones más básicas de física. El momento en que dio ese paso fue el mejor posible. En la primavera de ese mismo año recibió ofertas del Instituto de Tecnología de California y de la Universidad de California en Berkeley; en ambos lugares las investigaciones físicas apuntaban a la frontera más avanzada de las cuestiones básicas. En Caltech estaba Robert A. Millikan, que había acuñado la expresión "rayos cósmicos" en 1925; en Berkeley investigaba la física nuclear Ernest O. Lawrence, inventor del ciclotrón en 1930. Oppenheimer aceptó los dos puestos; lo normal era que pasase el período de otoño en Berkeley y el semestre de primavera en Caltech. En ambos centros tuvo alumnos destacados que contribuyeron a situar a la física estadounidense entre las mejores del mundo.

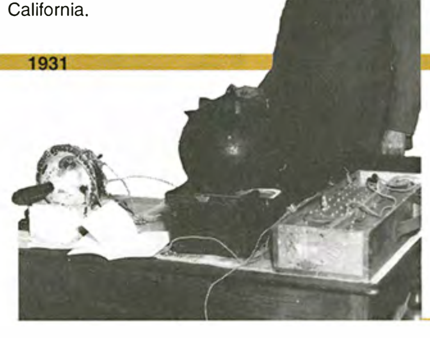
Una de las polémicas más acaloradas de principios de los años treinta fue la que se centró en una teoría propuesta por Dirac. El 2 de enero de 1928 el director de los *Proceedings of the Royal Society* recibió un manuscrito de Dirac titulado "La teoría cuántica del electrón". Este artículo, y su segunda parte publicada al mes siguiente, contienen seguramente el logro más importante de

Dirac. Su ecuación de ondas relativista, concebida para describir el electrón, emocionó a los físicos porque obtenía el espín de la partícula y su momento magnético correctos, pero también planteaba problemas inquietantes. Heisenberg le escribió a Pauli en julio de aquel año que "el capítulo más triste de la física moderna es y va a seguir siendo la teoría de Dirac". El principal problema de la ecuación estribaba en que daba soluciones tanto para los estados de energía positiva como para un número infinito de estados de energía negativa. En semejante situación la mecánica cuántica predice que los electrones podrían saltar a esos estados de energía negativa y, por lo tanto, terminar todos allí. En consecuencia, los electrones ordinarios no deberían existir.

Para sortear esta dificultad, Dirac imaginó que esos estados de energía negativa estaban ocupados por un número infinito de electrones. Pero si unos cuantos de esos estados estuviesen sin ocupar, aparecerían en forma de huecos positivos en un mar de carga negativa. En marzo de 1930 Dirac publicó un artículo en el que afirmaba que esos huecos positivos eran protones. Pero Oppenheimer, que leyó el texto de Dirac antes de su publicación, arguyó en una carta publicada ese mismo mes en la *Physical Review* que no era así. Señalaba que, si los huecos positivos de la teoría de Dirac fuesen protones, los electrones y los protones se aniquilarían mutuamente, lo que querría decir que la vida media de la materia ordinaria sería de unos 10^{-10} segundos. Hizo notar además que las partículas positivas propuestas por la teoría de Dirac habían de tener la misma masa que los electrones. En realidad esos huecos positivos eran los positrones, las antipartículas del electrón, pero en 1930 ni se los conocía ni nadie había predicho su existencia. A Oppenheimer le faltó poco para hacerlo en su respuesta a Dirac.

1931–1933





ROBERT A. MILLIKAN en 1932, con un espectroscopio registrador que construyó en el sótano de su casa para detectar los rayos cósmicos (*abajo*). Millikan acuñó la expresión "rayo cósmico" en 1925. Durante un experimento de radiación cósmica, Carl Anderson descubrió el positrón en 1932. A la derecha se le ve con Millikan y una fotografía de las trazas que revelaron la partícula. Oppenheimer coincidió con Millikan en el Instituto de Tecnología de California.

1931 1932 1933



ERNEST O. LAWRENCE situado a la izquierda de Oppenheimer. Lawrence inventó el ciclotrón en la universidad de California en Berkeley en 1930. Allí estudiaron ambos la física nuclear.

Aun tras el descubrimiento del positrón por el físico del Caltech Carl Anderson en 1932, la teoría de esa partícula que se seguía de la obra de Dirac estaba plagada de problemas. Oppenheimer y otros físicos que trabajaban en electrodinámica cuántica (QED) tenían muchas dudas acerca de la teoría básica. En 1930, por ejemplo, Oppenheimer mostró que cuando se aplicaba la teoría de la QED que ese mismo año habían publicado Heisenberg y Pauli a las interacciones entre los electrones, los protones y el campo electromagnético, el desplazamiento de las líneas espectrales era infinito. El escepticismo de Oppenheimer sobre la QED se mantuvo vivo a lo largo de esos años por las anomalías que observó trabajando con los rayos cósmicos, causadas por el muon y otras partículas de alta energía que entonces no se conocían.

En 1931 intentó hallar una ecuación del fotón que fuese análoga a la de Dirac para el electrón. Fracasó en su objetivo principal, pero descubrió la diferencia básica existente entre las partículas de espín semientero y las de espín entero, que luego constituiría el fundamento de la prueba formal dada por Pauli de la conexión entre espín y estadística.

La creación y la destrucción de materia

Según la mecánica cuántica, no sólo es posible la aniquilación de materia, sino también su creación, sujetas ambas a las leyes de conservación de la energía y el momento. Un rayo gamma, por ejemplo, puede dar lugar a un electrón y a un positrón en un proceso llamado de producción de pares. La idea de la producción de pares no se le ocurrió a Oppenheimer, pero sí fue él quien proporcionó la primera descripción correcta del fenómeno en 1933, con la ayuda de su alumno Milton S. Plesset. Junto con Wendell H. Furry, otro alumno suyo, desarrolló un año después la teoría del electrón y el positrón en la forma que básicamente se acepta hoy en día. Mostraron que la carga observada del electrón no es la carga verdadera; anticiparon así el fenómeno de la renormalización de la carga, que sirvió para explicar algunas de las dificultades iniciales que rodearon a los infinitos de la QED.

La mayoría de los experimentos de física de altas energías se efectuaban en la atmósfera de la Tierra por esta

época de los años treinta, ya que partículas de gran energía (del orden de los mil millones de voltios) de origen cósmico bombardean los átomos atmosféricos. Anderson descubrió el positrón en 1932 durante un estudio de la radiación cósmica en una cámara de niebla. Si se coloca una placa metálica, digamos de plomo, en una cámara de niebla, una traza de rayo cósmico que incida por su parte superior originará otra serie de trazas que saldrán de determinado punto de su superficie inferior. Oppenheimer y su alumno J. Franklin Carlson mostraron que estos "chaparrones" de rayos cósmicos, compuestos por lo común de fotones, electrones y positrones, son el resultado de una cascada de producciones de pares de electrones y positrones. Se puede, claro está, variar el grosor de la placa de plomo. Si el rayo cósmico primario era un fotón o un electrón, Oppenheimer y Carlson observaron que una placa de plomo de 20 centímetros de grosor absorbía toda la radiación resultante, en el caso de los valores de energía experimentados.

Datos adicionales descubrieron, sin embargo, que la penetración era mayor de lo que cabía esperar de fotones y electrones. Llegaron así a la conclusión de que "hay otro componente de los rayos cósmicos". Pocos meses después, equipos investigadores de Caltech y de Harvard descubrieron simultáneamente una partícula nueva. Oppenheimer y su colega Robert Serber, de Berkeley, la identificaron con la que el físico japonés Hideki Yukawa había predicho para explicar las fuerzas nucleares. Pero la partícula recién descubierta resultó ser el muon. La partícula predicha por Yukawa era el pion, que tardó más tiempo en encontrarse.

Mientras estaba en Berkeley las investigaciones de Oppenheimer se centraban en el acelerador. Cuando James Chadwick descubrió el neutrón en 1932 se abandonó la teoría de que el núcleo constaba de protones y electrones, que fue sustituida por el modelo moderno de protones y neutrones. Durante la primavera de 1933, Lawrence empezó a acelerar deuterones, que están formados por un solo neutrón y un protón, y bombardeó con ellos núcleos pesados. Descubrió que los deuterones desintegraban los núcleos con mayor eficacia que los protones y, muy poco después, que de los núcleos que hacían de blanco se desprendían partículas alfa.

Luego se obtuvo un resultado desconcertante: cuando deuterones de gran energía chocaban contra cualquier tipo de núcleo, el blanco desprendía protones que siempre tenían energías bastante parecidas. La causa del misterio resultó ser la contaminación del aparato de Lawrence por los deuterones, de modo que los protones observados provenían todos de la fusión del deuterio. Antes de que se llegase a tal explicación, sin embargo, se investigó mucho sobre las reacciones implicadas. Oppenheimer y su alumna Melba N. Phillips mostraron que cuando un deuterón chocaba con un núcleo pesado, éste podía capturar el neutrón del deuterón, con lo que el protón quedaba libre. La teoría de esta reacción formulada por ellos explicaba con precisión los extraños resultados de Lawrence.

Las estrellas de neutrones y los agujeros negros

Hoy se acepta que las estrellas de neutrones y los agujeros negros son etapas finales de la evolución estelar; la existencia de unas y de otros se propuso por razones teóricas durante los años treinta. Oppenheimer y dos de sus alumnos, George M. Volkoff y Hartland S. Snyder, estuvieron en la vanguardia de ese avance. Oppenheimer y Volkoff se interesaron por una idea planteada por otro investigador, la de que una estrella de masa lo suficientemente grande y que hubiese agotado su energía nuclear podría formar un núcleo de neutrones. Para comprobar su viabilidad, emprendieron la comparación de dos tratamientos gravitatorios del proceso, uno basado en la teoría de Newton y el otro en la de Einstein.

La ecuación de Oppenheimer-Volkoff, basada en la relatividad general, proporcionaba el gradiente de presión en el interior de una estrella y reveló que la presión crecía con la profundidad más deprisa de lo que resultaba de un cálculo de tipo newtoniano. Ambos físicos realizaron además los primeros cálculos detallados de la estructura de una estrella de neutrones y pusieron así los cimientos de la teoría de la estructura estelar basada en la relatividad general. Justo antes de la publicación del artículo que recogía este trabajo, Oppenheimer escribió una carta a George E. Uhlenbeck, físico teórico de la universidad de Michigan que, con su colega Samuel A. Goudsmit, había descubierto el espín del electrón, en la que le decía: "Hemos ... trabajado en las soluciones estáticas y no estáticas para masas muy pesadas ... puede que las estrellas viejas se derrumben y creen núcleos formados por neutrones. Los resultados son muy raros..."

Y se volvieron todavía más extraños. Ese mismo año Oppenheimer y Snyder publicaron un artículo clásico, titulado "Sobre la contracción gravitatoria continua", en el que indicaban que cuando una estrella de mucha masa agotaba su fuente interna de energía nuclear, su destino final venía determinado por la cantidad de masa que pudiese expulsar, ya fuera por radiación o por desprendimiento debido a una rotación rápida. Una vez agotadas todas las vías de pérdida de masa, sólo queda el núcleo, mantenido por la fuerza gravitatoria, que le haría derrumbarse sobre sí mismo en ausencia de una energía termonuclear que la contrarrestase.

A medida que se produce este colapso, la luz que irradia el núcleo se va desplazando cada vez más hacia el rojo, es decir, su longitud de onda se va alargando; además su vía de escape hacia el espacio es cada vez más angosta, hasta que se cierra sobre sí misma y deja tras de sí una fuente de atracción gravitatoria inobservable desde fuera. Oppenheimer y Snyder proporcionaron así el primer cálculo de cómo podía formarse un agujero negro.

Los púlsares, de los que hoy se sabe que son estrellas de neutrones en rotación, se vieron por primera vez en 1967, el año en que Oppenheimer murió de cáncer en Princeton. Si hubiese vivido más, podría haber disfrutado del reconocimiento que ese descubrimiento aportó a su física de preguerra, que había quedado ensombrecida por la tarea que realizó durante el periodo bélico y por su fama de posguerra.

JOHN S. RIGDEN recibió el doctorado en la universidad Johns Hopkins en 1960. Ahora es director de los programas de física del Instituto Americano de Física.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THREE TRIBUTES TO J. ROBERT OPPENHEIMER. Hans A. Bethe. Institute for Advanced Study, Princeton, N. J., 1967.

J. ROBERT OPPENHEIMER, 1904-1967. Hans A. Bethe en *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*, vol. 14, páginas 391-416; 1968.

OPPENHEIMER. I. I. Rabi, Robert Serber, Victor F. Weisskopf, Abraham Pais y Glenn T. Seaborg. Charles Scribner's Sons, 1969.

THE OPPENHEIMER CASE: SECURITY ON TRIAL. Philip M. Stern. Hart-Davis, 1971.

J. ROBERT OPPENHEIMER: LETTERS AND RECOLLECTIONS. A. Kimball Smith y C. Weiner. Harvard University Press, 1980.

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN 150 YEARS OF INNOVATION

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Manuel Puigcerver: *Asteroides y cometas como amenaza para la Tierra*; Víctor Sánchez Margalet: *Tratamiento de la diabetes por trasplante celular*; Joandomènec Ros: *La luz de los fondos marinos* y *De cerca*; Carmen Santamaría y Nicolás García Tapia: *El trabuco*; Juan Pedro Campos: *J. Robert Oppenheimer*; José M.ª Fullola y Manuel Fullola de Hériz: *Las cuevas paleolíticas de Francia*; Jürgen Goicoechea Middelmann: *Los diagramas de Lyapunov*; Luis Bou: *Plásticos conductores* y *Bloc de notas*; J. Vilardell: *Hace...*; A. Garcimartín: *Perfiles*

Ciencia y sociedad:

Juan Pedro Campos, Oriol Pascual

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

Libros:

Luis Bou y Ana M.ª Rubio

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: Bruce H. Robison; Sea Studios

Página	Fuente
5-12	Le Scienze
14-15	Tomo Narashima
16-17	Michael Goodman (*abajo*); Lelio Orci, Centro Médico Universitario, Génova (*superior derecha*)
18	Tomo Narashima
19	Paul E. Lacy
20	Will van Overbeek
22-23	Roberto Osti
24-25	Bruce H. Robison; Sea Studios (medusa, gusano pelágico, ctenóforo); Kim Reisenbichler (*Vampyroteuthis*)
26-27	Bruce H. Robison; Instituto de Investigación del Acuario de la Bahía de Monterrey (*inf. dcha.*)
28	Marsh Youngbluth, Institución Oceanográfica Harbor Branch (*foto*); Carey Ballard (*gráfica*)
29	Instituto de Investigación del Acuario de la Bahía de Monterrey
43	Sociedad Arqueológica Luliana
44-48	Misericòrdia Ramon, Antònia Picornell y José A. Castro
50-51	Guglielmo Galvin
52-53	Jared Schneidman Design
54	Cortesía de Paul E. Chevedden (*fotografía*); Ian Worpole. Fuente: K.A.C. Creswell (*mapa*) (*arriba*); Museo del Palacio de Topkapi, Estambul (*abajo*)
55	Estado de la Baja Sajonia y Biblioteca Universitaria, Göttingen
57	© Arnold Newman
58-59	(*de izquierda a derecha*) AP/Wide World Photos; Universidad de Cambridge; Archivo Bettman; Universidad de Cambridge; Archivos CIT; UPI/Bettman; Gerd Binnig y Heinrich Rohrer
60	(*de izquierda a derecha*) AP/Wide World Photos; Archivos CIT; AP/Wide World Photos
62-63	Jean-Clottes-Sygma
64	Documents Pour la Science
65	J. Clottes-Sygma (*arriba*); A. Chêné-Centro Camille Jullian (*abajo*)
66	A. Chêné-Centro Camille Jullian (*arriba*); Jean Vertu (*centro izda.*); Michel Lorblanchet (*calco, centro dcha.*) y J. Vertu (*abajo*)
67	A. Chêné-C. Camille Jullian (*izquierda*) y J. Vertu (*derecha*)
68	Jean Clottes
78	Charles O'Rear
80-82	Karl Gude
83	Charles O'Rear



La exploración directa de las zonas profundas de los mares permite conocer mejor la vida que allí se desarrolla. A niveles donde ya no alcanzan los rayos solares abundan las criaturas frágiles y gelatinosas, pero no faltan las de aspecto amenazador, como este pez, *Anaplogaster cornuta*, cuyo nombre vulgar parece el más adecuado: *Colmillos*. (*Véase* "La luz de los fondos marinos", por Bruce H. Robison, en este mismo número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
Carmen Lebrón Pérez
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Marguerite Holloway, *News Editor*; Ricki L. Rusting, *Associate Editor*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; John Horgan, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler; Philip Morrison, *Book Editor*; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; Corey S. Powell; David A. Schneider; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam; Glenn Zorpette
PRODUCTION Richard Sasso
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CO-CHAIRMAN Dr. Pierre Gerckens
DIRECTOR, ELECTRONIC PUBLISHING Martin Paul

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	7.700	14.000
Extranjero	8.600	15.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 700 pesetas
Extraordinario: 900 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA

Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Filmación: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A., Avila, 112-114 4ª pl. - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 - 08907 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotocayfo, S.A., Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España